



Михаил Перцовский, Евгений Воробьев, Алексей Трифонов

# Применение логических анализаторов в тестировании цифровой техники

В статье описаны эксплуатационные возможности и функциональные особенности современных логических анализаторов.

## Класс задач, в которых применяется логический анализатор

С появлением цифровых систем, в частности, микропроцессоров, встала задача их отладки и тестирования. Для этой цели использовался прибор, называемый логическим анализатором (ЛА), задача которого сводилась к фиксации цифровых последовательностей сигналов, их визуализации и анализу. ЛА использовались разработчиками аппаратуры и для ряда других специфических задач. Основные требования к этому типу приборов были сформулированы в ходе разносторонней эксплуатации и впоследствии были взяты за основу для новых разработок.

В настоящее время цифровая техника получила бурное развитие. Аналоговая аппаратура вытесняется цифровой в самых различных областях, таких как промышленная автоматизация, управление летательными аппаратами, телевидение, телефония. Эта тенденция приобретает в последнее время массовый характер. Традиционные цифровые устройства, например микропроцессоры, также не стоят на месте, обуславливая совершенствование ЛА. Средства тестирования оказались необходимыми не только разработчику, но и пользователю. В соответствии с этим интерфейс ЛА приобрел более дружелюбный вид, а сами приборы

стали выпускаться не для конкретных целей, а для широкого круга задач, увеличивая тем самым функциональные возможности и количество настроек ЛА.

## Некоторые особенности и возможности логических анализаторов

В [1] дано следующее определение ЛА:

*«Логические анализаторы — контрольно-измерительные приборы, предназначенные для сбора данных о поведении дискретных систем, для обработки этих данных и представления их человеку на различных уровнях абстракции. Они работают независимо и незаметно для испытуемых дискретных систем и применяются для их отладки и диагностирования (в первую очередь микропроцессорных систем) на всех этапах жизненного цикла.»*

Логические анализаторы характеризуются числом каналов, емкостью памяти на канал, частотой записи, способами синхронизации и запуска, формами представления данных.

Для определения значений сигналов ЛА используют компараторы, с помощью которых выясняется, выше или ниже входной сигнал заданного порогового уровня. Если сигнал превышает порог, его уровень определяется как высокий, если ниже порога, то низкий

(рис. 1). Пороговое напряжение компараторов, как правило, может регулироваться (в основном от  $-10$  до  $+10$  В).

Подключение ЛА требует доступа к участкам цифрового устройства (например, выводам микросхем или трассам платы). Анализаторы снабжаются специальными щупами и зажимами. Основное требование — минимизация влияния прибора на испытуемое устройство. ЛА должны обладать высоким входным сопротивлением (примерно 1 МОм) и малой входной емкостью (порядка 10-25 пФ). Для обеспечения этих требований компараторы логических уровней делаются выносными.

Запись информации в ЛА происходит по тактовым сигналам (clock). В

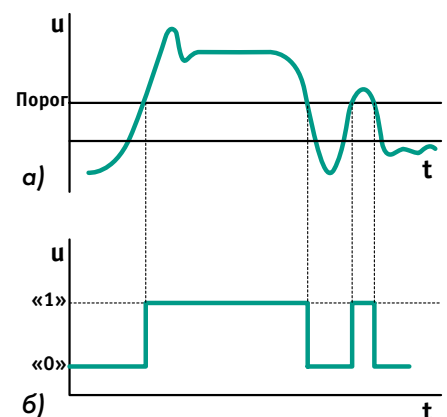


Рис. 1. Вид сигналов на входе (а) и выходе (б) компаратора

том случае, когда тактовые сигналы поступают от внутреннего генератора независимо от испытуемого объекта, реализуется *асинхронный* режим записи данных. Если для синхронизации работы ЛА используются сигналы испытуемого объекта, то реализуется *синхронный* режим записи данных. При этом значения могут записываться фронтом или срезом тактового сигнала. Выборочная запись информации реализуется с помощью *квалификаторов* [1] – отдельных каналов, не фиксируемых в памяти, но определяющих возможность записи входных данных в память. Это позволяет экономить объем свободной памяти.

В реальных системах могут возникать импульсы и всплески, длительность которых меньше длительности тактового сигнала. Такие ложные сигналы считаются помехами. Существует два способа обнаружения помех: увеличение тактовой частоты в асинхронном режиме и применение «ловушек». В первом случае помехи фиксируются и визуализируются как данные, во втором случае помехи фиксируются отдельно от основных данных и визуализируются не как биты данных, а как ложные сигналы.

Основное разнообразие в семейство логических анализаторов вносят способы запуска и формы представления данных. Этим вопросам далее будет уделено особое внимание.

Традиционно ЛА выпускались рядом фирм, таких как Hewlett-Packard (HP)\*, Tektronix, Philips. Эти компании имеют свои взгляды на состав и особенности ЛА, но основные принципы можно считать неизменными.

### РАЗДЕЛЕНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРОВ ПО ФУНКЦИОНАЛЬНОМУ НАЗНАЧЕНИЮ

В соответствии с сегодняшними требованиями можно разделить ЛА на несколько типов. Фирма Tektronix выделяет два основных типа: анализаторы микропроцессорных систем на программном уровне описания (embedded microprocessor software debug applications), называемые также *анализаторами состояний* (state analyser) и анализаторы цифровых систем на логическом и временном уровне (hardware debug applications), называемые *анализаторами временных соотношений* (timing analyser).

\* С конца 1999 года логические анализаторы HP выпускаются под логотипом новой компании Agilent Technologies.

Label	Base	ADDR	Symbol	P54C/CN Inverse Assembly
				Mnemonics/Hex
4212		:get_message+006C		C0 MOV AX, [BX+0154]
				C4 MOV BX, [BP+06]
				C7 MOV [BX+10], AX
4214		:get_message+0074		CA MOV AX, #0014
				CD INUL WORD PTR [BP+04]
4216		:get_message+007C		D0 MOV BX, AX
				D2 MOV [BX+0142], #0000
4219		:get_message+0084		D8 POP SI
				D9 POP DI
				DA MOV SP, BP
				DC POP BP
				DD RET NEAR
4235	display_requ+0024			D4 JLE display_requ+00000018
				D6 ADD [SI+03], DH
4237	display_requ+002C			D9 JMP display_requ+0000003D
				DC MOV AX, #0002

Рис. 2. Представление дисассемблированного кода в ЛА Hewlett-Packard

Первый тип ЛА характеризуется отсутствием явной причинно-следственной связи между событием и вызванным им следствием. Причем событие и следствие намного разнесены по времени. Очень часто следствие, вызванное неисправностью, появляется много позже, чем неисправность. Поэтому основные требования для таких анализаторов – наличие разнообразных сложных механизмов запуска, позволяющих отследить причину и следствие, и большие объемы памяти, необходимые для этого. Основной задачей ЛА данного типа является фиксация логических состояний на шинах процессора с частотой, соответствующей частоте работы процессора. Целесообразнее использовать внешнюю синхронизацию процессора и синхронный режим, вследствие чего частота синхронизации будет, как правило, меньше, чем у второго типа ЛА.

Для отладки микропроцессорных систем требуется не только зафиксировать логические состояния, передаваемые по одной магистрали, но и идентифицировать информацию, то есть определить, к какому типу она относится (данные, команды или управление). Для этого используют многофазную синхронизацию. Этот режим работы анализатора может быть реализован следующим образом. Входные каналы анализатора разбиваются на две или три группы. По одной группе каналов записывается адрес, по другой – данные, по третьей – команды и коды управления. Каждая группа каналов записывается по своему тактовому сиг-

налу и в свои разряды буферного регистра. После прихода всех тактовых импульсов данные из буферного регистра подаются одновременно и в память, и на логический компаратор. Информация из памяти расшифровывается, коды команд переводятся в мнемонический код, соответствующий данному типу процессора, а данные и коды управления остаются без изменений. Эта операция называется дисассемблирование, после чего производится визуализация и сохранение информации (рис. 2).

Второй тип ЛА характеризуется тесной причинно-следственной связью и хронологической зависимостью между событием и следствием. Поэтому часто требуется срабатывание ЛА именно по причине, а не по следствию. Для данного типа характерен небольшой объем памяти, но анализ временных соотношений требует более высокой частоты опроса. В таких устройствах чаще всего используется асинхронный режим, позволяющий отследить временные сдвиги сигналов. Способы запуска таких анализаторов не отличаются большим разнообразием и часто ограничиваются запуском по какому-либо событию.

Частота исследуемых сигналов значительно возросла, поэтому существенное влияние на работу системы может оказать изменение формы сигналов. Это привело к тому, что помимо оценки временных характеристик часто бывает необходимо исследовать такие характеристики сигналов, как активные длительности фронта и среза,

активная длительность импульса, всплески, дребезг сигналов и т.д. Для этого в состав модуля ЛА включается цифровой осциллограф, позволяющий видеть реальный сигнал и использовать его параметры при задании способов запуска ЛА.

Рассмотрим основные типы ЛА на примере анализаторов фирмы HP [2].

1. Настольный логический анализатор (benchtop logic analyser). Предназначен для решения комплексных задач программно-аппаратной отладки микропроцессорных систем (рис. 3). Сочетает в себе все необходимые возможности для решения конкретной задачи. Прибор может включать различные опции, например, аналоговый вход, большой объем памяти, осциллограф, генератор логических состояний.

2. Модульная система логического анализа (modular logic analysis system). Предоставляются наборы измерительных средств для различных задач тестирования цифровых систем, например, модули анализа временных соотношений и анализа состояний (state and timing analysis modules), модули цифрового осциллографа (digitizing oscilloscope modules), генератор логических



**Рис. 3.** Настольные логические анализаторы Hewlett-Packard

состояний (pattern generator module), программные анализаторы реального времени (real-time software analysers). Модульная система представляет собой более мощное средство логического анализа, чем настольный логический анализатор. Она включает основной блок (mainframe) и набор модулей. При помощи добавления различных модулей можно как наращивать число каналов системы, так и расширять ее функциональные возможности.

3. Анализатор прототипов (prototype analyser). Используется для обработки и визуализации сигналов, собранных при помощи модульной системы логического анализа. Пользователю предоставляется удобный оконный интерфейс, позволяющий в различных окнах

разместить такие представления сигналов, как временные диаграммы, листинг кода, гистограммы и т.д. С помощью маркеров обеспечивается привязка сигналов во времени для всех окон.

### СПОСОБЫ ЗАПУСКА ЛОГИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРОВ

Как уже было сказано, ЛА различаются по способам их запуска.

Большинство ЛА предоставляют различные возможности для задания способов запуска. Пользователю предлагается определить события, которые будут последовательно оцениваться ЛА и при возникновении которых осуществляется запуск. События могут комбинироваться, зависеть друг от друга, оцениваться одновременно. Такие события называются условиями запуска.

Основная функция запуска — оставить в памяти данные, которые полностью описывают событие, определяемое условиями запуска. Запуск срабатывает только после сбора необходимого количества информации, предшествующего запускающему событию. Эта информация называется предисторией (prehistory). Информация, собранная после прихода запускающего события, называется послееисторией (posthistory). Такая особенность запуска определяется цикличностью записи в память. Каждое новое слово записывается в следующую ячейку памяти.



Когда память заполняется, новая информация записывается поверх старой в циклическом порядке. При остановке сбора в памяти выделяется «окно» необходимых пользователю данных, содержащее определенную пользователем предысторию и послеисторию.

Механизм запуска также может использоваться для подсчета событий, для выборочной записи информации или для отображения в реальном времени.

Способы запуска зависят от того, для какой задачи используется ЛА. Если в системе анализируются логические уровни и их временные соотношения, то и условия должны содержать набор состояний входов и выходов, временные соотношения между ними, времена существования набора состояний. Если производится отладка и тестирование микропроцессорных систем, то условие срабатывания должно содержать наборы команд, данных или их сочетания и временные соотношения между ними.

Так, например, ЛА фирмы Tektronix используют для задания запуска автомат состояний срабатываний (trigger state machine). Этот автомат может содержать до шести состояний, где каждое состояние содержит от одного до четырех условных выражений типа «если-то-иначе» (if-then-else). Каждое выражение оценивает комбинации из событий, число которых может быть до восьми, а выполнение его условий может определять до восьми действий. С приходом сигнала синхронизации в текущем состоянии оцениваются все выражения «если-то-иначе». Первое выражение в списке, условия которого выполняются, преобладает над остальными, и далее производятся действия, связанные с этим выражением. Если не выполняются условия ни одного выражения, автомат запуска остается в текущем состоянии и действия не производятся.

ЛА фирмы HP предоставляют библиотеку макросов, определяющих параметры срабатывания (рис. 4). Каждый макрос имеет график измерения и структуру, похожую на предложение. Семейство макросов включает в себя основные макросы, последовательно определенные макросы, включая нахождение последовательности из  $n$  бит, макросы нахождения временных несоответствий, включая нахождение некоторого события  $X$ , произошедшего вскоре после события  $Y$ .

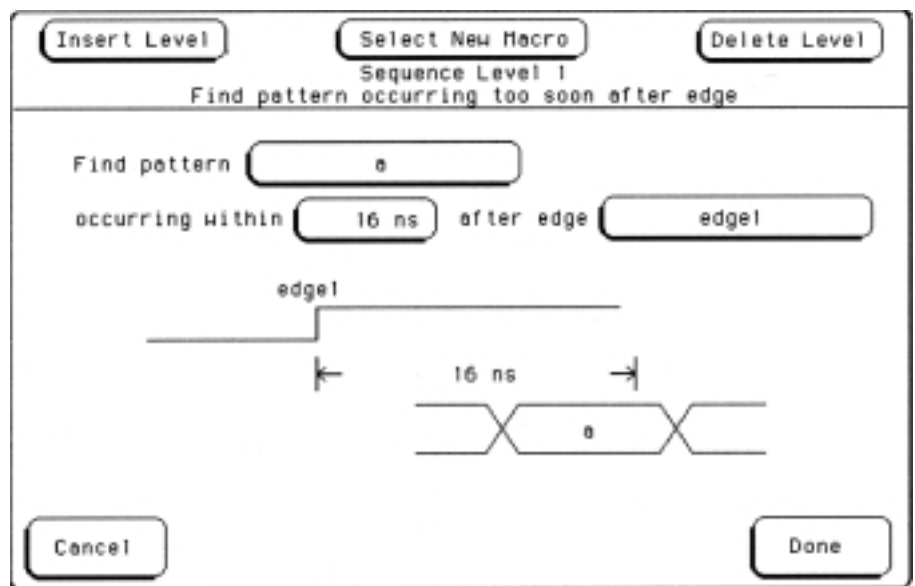


Рис. 4. Экран задания макроса анализатора HP

Основу всех библиотек и состояний запуска составляют несколько основных условий.

Первую группу условий можно определить как *регистрацию событий*. Канал или группа каналов определяются как тестовые, и каждое опрошенное значение этой группы проверяется на соответствие событию, определенному пользователем. Исключение каналов из тестовой группы возможно с помощью маскирования каналов.

Самый простой способ запуска, применявшийся уже в первых анализаторах, — *запуск по кодовому слову* (по комбинации значений сигналов). Введение в логический анализатор схемы запуска такого типа позволяет производить запуск при появлении на входах логического анализатора определенного, заранее выбранного двоичного слова.

Программы, как правило, содержат циклы подпрограмм и даже вложенные циклы, так что выбранное запускающее слово при последовательных проходах цикла может встречаться многократно. Чтобы анализатор мог различать эти циклы, в устройство запуска добавляется счетчик проходов, который задерживает момент фиксации данных в памяти, отсчитывая не синхросигналы, а число появлений запускающего слова, так что запуск производится по  $n$ -му проходу подпрограммы. Такой запуск называется *запуском по последовательностям слов*.

Больше всего хлопот доставляют перемежающиеся неисправности, которые появляются не часто, случайным образом, и при обычных периодически повторяющихся экспериментах могут

не обнаруживаться. Для борьбы с перемежающимися неисправностями дискретных систем в некоторых моделях анализаторов предусмотрен *запуск по несовпадению*. Используя определенный критерий запуска, анализатор фиксирует пришедшие данные и берет их за эталон, с которым сравнивает следующую последовательность данных, удовлетворяющую критерию запуска. Если данные различны, производится запуск ЛА. Возможно также задание эталонного набора данных пользователем.

Может применяться комбинация описанных вариантов для задания более сложного запуска, например, такого, как подсчет времени, в течение которого данные не соответствовали заданному эталону.

Вторая группа условий — это запуск по помехе. ЛА может включать в себя встроенный детектор помех, который непрерывно ожидает помехи на каждом канале. Детектор помех отслеживает поток собираемых данных. Когда возникает помеха, ЛА срабатывает и помеха выводится на экран.

Детектор помех используется в основном для исследования помех на линии синхронизации. В высокоскоростных логических устройствах параметры синхронизации наряду с качеством сигнала — один из важнейших показателей.

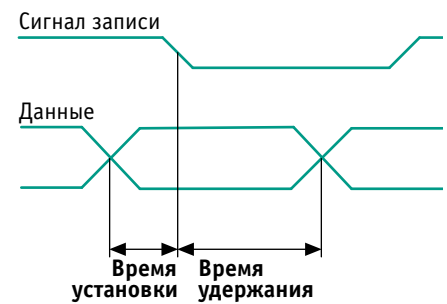
Третья группа условий — запуск по установке и удержанию (setup-and-hold). Запуск происходит по нарушению наиболее критичных параметров временных соотношений сигналов — времени установки сигнала и его удержания.

жания (рис. 5). Встроенный контролер установки и удержания определяет переключения во входных сигналах после того, как они собраны. Нарушения обнаруживаются, если переключения сигналов находятся в пределах интервала, определенного пользователем. С помощью данного метода может быть определен разброс времени установки и удержания сигнала, помогающий определить критичные условия работы устройства.

Четвертая группа условий — запуск с помощью цифрового осциллографа. Совместно с логическим анализатором часто применяется цифровой осциллограф, сигналы от которого могут использоваться для запуска анализатора. Используются различные виды запуска. *Запуск по перепаду* — запуск по событию, когда фронт или спад пересекает заданный уровень; *запуск переключения* — по заданному уровню фронта и/или спада и временному интервалу. Срабатывание происходит, когда пересекается заданный уровень и время фронта или спада, в зависимости от требований пользователя, выше или ниже установленного. *Запуск по помехе* — отслеживание паразитных импульсов. *Запуск по ширине импульса* — контролируется продолжительность импульса. *Запуск по прошествии времени* используется при «зависании» системы, когда логические состояния не изменяются и анализатор срабатывает по прошествии некоторого времени после «зависания». Также цифровой осциллограф может использоваться при таких запусках, как *запуск по установке и удержанию* и *запуск по кодовому слову*.

### ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СОБРАННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Когда нужна информация собрана, возникает необходимость ее представления на экране. Причем визуализировать требуется не только собранную информацию, но и результаты ее обработки (например диаграммы и коды). На ранней стадии развития средств представления информации достаточно было текстовых черно-белых мониторов с небольшим разрешением. Сейчас используются самые современные средства: мониторы с высоким разрешением и глубиной цвета, позволяющие реализовать отображение в графическом режиме, многооконный интерфейс, упрощающий настройку прибора и визуализацию информации, мани-



**Рис. 5.** Установка и удержание сигнала

пуляторы мышь, существенно упрощающие работу с прибором.

Например, Prototype Analyser фирмы HP предоставляет возможность подключения к внешнему монитору и поддерживает при этом разрешение 1024·768. ЛА фирмы Tektronix дает возможность самим обрабатывать данные с помощью интерфейса программирования TLA 700 (TPI), базирующегося на технологии Microsoft COM. Пользователь может с использованием привычного ему средства разработки написать приложение, конфигурирующее ЛА, собирающее и визуализирующее информацию.

Наиболее распространенной формой представления данных являются временные диаграммы и таблицы состояний. При отображении применяются такие средства, упрощающие работу с данными, как маркер запуска, индицирующий момент запуска, масштабирование по осям, курсор или экранный указатель, перемещая который, можно отслеживать значение данных. Данные в таблице состояний могут воспроизводиться в различных кодах (двоичном, шестнадцатеричном, ASCII и т.д.). Для удобства восприятия применяется группировка строк и столбцов данных в блоки.

Для удобства представления и возможности отладки программ в анализаторах состояния данные описываются на языке ассемблер, причем, как правило, адреса изображаются в шестнадцатеричном виде, команды декодируются в мнемонический код, а управляющие линии, метки и линии состояния записываются в двоичном коде.

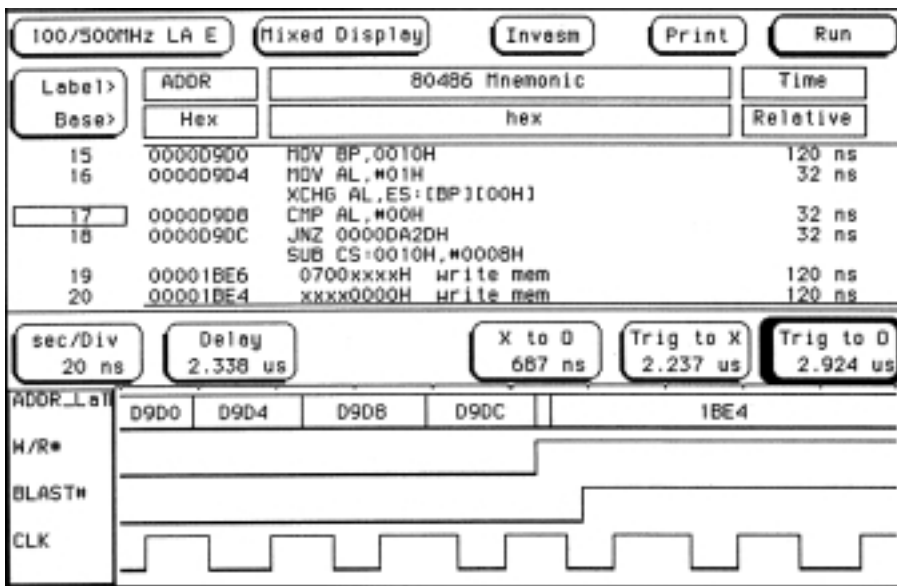
Профессиональные ЛА предоставляют возможность коррелировать по времени анализ состояний и анализ временных соотношений и показывать это на экране (рис. 6).

При отображении и просмотре информации обычно имеется возможность осуществлять фильтрацию ин-

**ЛОГИЧЕСКИЕ АНАЛИЗАТОРЫ НА БАЗЕ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА**

Отечественный рынок средств диагностики и отладки цифровых систем имеет свои особенности. Часто решающим фактором является цена изделия, в связи с чем получили распространение ЛА, выполненные в виде периферийных устройств или плат расширения для персональных компьютеров. Зачастую по своим техническим параметрам, надежности, обеспечению документацией и сопровождению такие анализаторы не уступают западным аналогам.

Например, фирма «Лаборатория автоматизированных систем и управления» («АС») предлагает целый ряд ЛА на базе персонального компьютера (ПК) с числом каналов от 16 до 64 и скоростью записи до 100 МГц. Устройства ввода логических сигналов выполнены в виде встраиваемых плат или внешних устройств, осуществляющих обмен с компьютером через параллельный порт. Это существенно уменьшает стоимость изделия, не ухудшая его характеристик. Настройка системы и визуализация собранной информации производится программной оболочкой (рис. 8), причем высокая производительность ПК не обязательна, так как встраиваемые платы включают в себя все быстродействующие модули ЛА: память, счетчики предыстории и послейстории, модуль запуска, детектор помех. Модульное построение программного обеспечения, а также возможность добавления в ПК дополнительных плат ЛА делают систему гибкой и легко адаптируемой к конкретным задачам диагностики цифровых устройств. Это позволяет исполь-



**Рис. 6.** Временное соотношение кода и временных диаграмм в анализаторе Tektronix

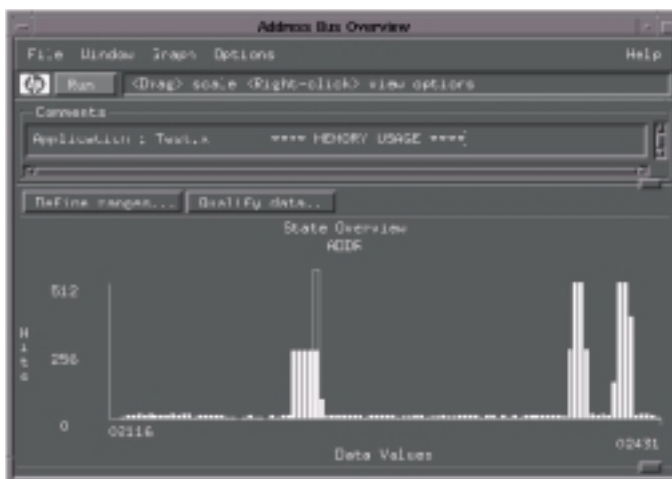
формации при выводе, поиск, сравнение, назначение закладок и меток, расчет временных интервалов между указанными точками и т.д.

Существует такой способ отображения, как карта состояния. В этом режиме вместо таблицы единиц и нулей на экране воспроизводится матрица 2N точек. Каждая точка представляет одну возможную комбинацию значений N входных линий, так что любое исходное слово — точка. Слово, содержащее все нули, находится в верхнем левом углу экрана; слово, содержащее все единицы, — в нижнем правом углу. Точки взаимосвязаны таким образом, что можно наблюдать последовательность обработки данных. Отрезок линии становится более ярким по мере приближения к новой точке, указывая тем самым направление потока данных. Такой способ дает воз-

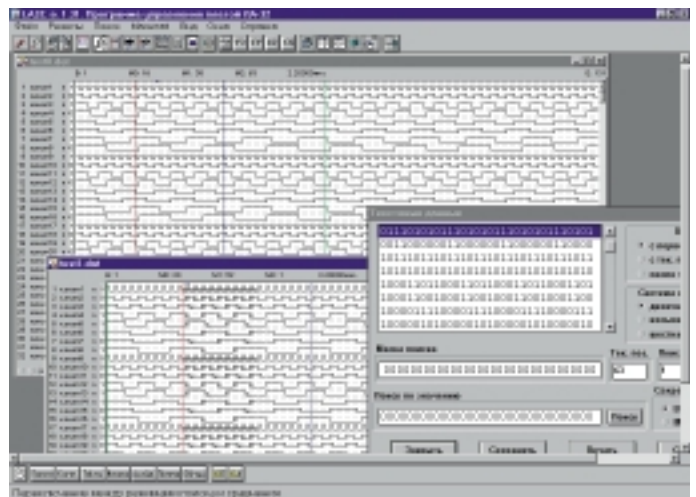
можность весьма быстрого обнаружения искажений программы путем сравнения с «образцовой» картой состояния.

При отображении очень часто используются гистограммы, показывающими, например, повторяемость данных (рис. 7). При этом используются такие возможности, как выбор значения шкалы повторяемости (абсолютное, процентное), сортировка шкалы данных, использование цвета, шрифтов и т.д.

Гистограммы могут показывать количественную характеристику повторяемости событий, таких как число вызовов функций, процедур или других событий, определяемых пользователем. Другой тип гистограмм показывает временную характеристику повторяемости события, отражая время выполнения определенных событий.



**Рис. 7.** Пример гистограммы ЛА Hewlett-Packard, показывающей число обращений к памяти



**Рис. 8.** Система анализа цифровой информации фирмы «АС»

зывать ее как законченное устройство (ЛА) или как базовое средство для разработки систем цифровой диагностики «под ключ».

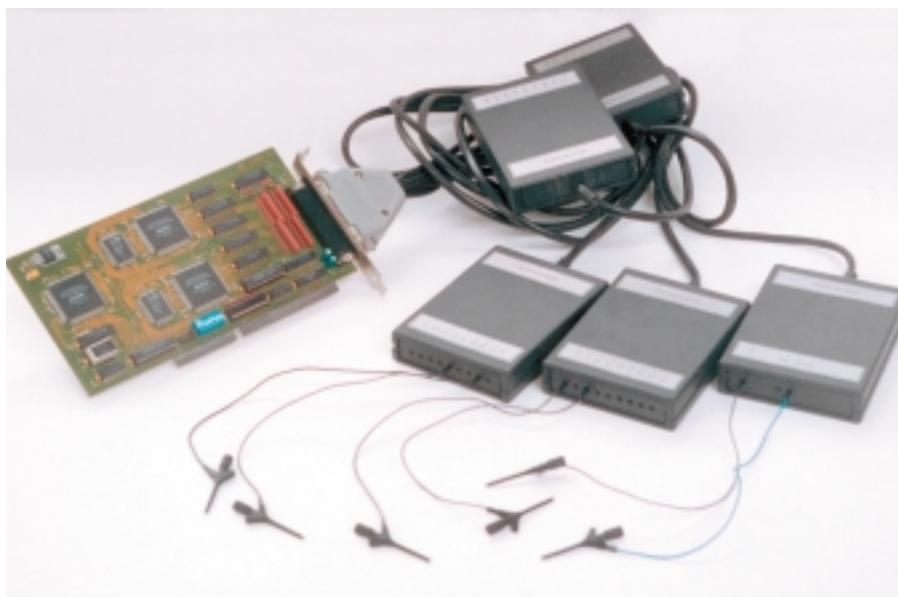
Системы фирмы «АС» работают в асинхронном и синхронном режимах сбора информации. Запуск анализатора производится по кодовому слову с использованием маскирования каналов.

При необходимости исследования формы сигналов ЛА фирмы «АС» может дооснащаться программным осциллографом, реализованным на базе встраиваемой платы с АЦП. В этом случае система синхронизирует свою работу с осциллографом, отображая не только уровни сигналов, но и их форму.

Для подключения ЛА к тестируемому устройству используются выносные аналоговые компараторы, обеспечивающие большое входное сопротивление и малую входную емкость (рис. 9).

Программная оболочка ЛА осуществляет управление сбором и визуализацию собранных данных в виде временных диаграмм и таблиц состояний, при этом включая в себя набор таких сервисных услуг, как экранный указатель, поиск заданных блоков данных, сравнение, масштабирование.

Для полноценного диагностирования закрытого цифрового устройства бывает необходимо не только собирать цифровую информацию, но и подавать на вход устройства некоторое воздействие в виде последовательностей цифровых сигналов. Для данной цели используют генераторы слов. «Генераторы слов (генераторы данных, генераторы тестовых последовательностей) — приборы, предназначенные для формирования и подачи входных воздействий на проектируе-



**Рис. 9.** ЛА32 с выносными аналоговыми компараторами

мую или диагностируемую дискретную систему.»[1]. Генераторы слов должны иметь большое количество каналов, формирователи входных воздействий, а также объем памяти, достаточный для записи необходимого объема тестовых последовательностей, высокую частоту подачи воздействий, соответствующую частоте работы тестируемого устройства, и возможность регулировать частоту. Фирмой «АС» разработан генератор слов, отвечающий основным перечисленным требованиям. Создание и редактирование сигналов производится как в виде временных диаграмм, так и в виде таблиц состояний, с возможностью перевода заданного набора сигналов из одного вида в другой. Редактирование и визуализация заданного набора сигналов включает тот же набор сервисных услуг, что и ЛА. На базе систем анализа цифровой информа-

ции и генератора слов возможно создание комплексов диагностирования, объединяющих обе системы, с согласованным по времени распространением сигналов, с общим программным обеспечением, осуществляющим управление всем комплексом.

*Авторы благодарны В.В. Веденкину за ценные замечания при написании данной статьи. ●*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Микропроцессоры: [В 3 кн.] /Кн.3.— Под ред. Л.Н. Преснухина. — М.: Высшая школа, 1982.
2. Hewlett-Packard Test & Measurement Catalog 1999.

**Авторы — сотрудники  
«Лаборатории  
автоматизированных систем  
и управления»  
Телефон: (095) 255-3155**